

Techniken zur kombinierten Darstellung von 2D-Bodenradar und 3D-Punktwolken zur Analyse des Straßenraums

JOHANNES WOLF¹, SÖREN DISCHER¹ & JÜRGEN DÖLLNER¹

Zusammenfassung: Bei Mobile-Mapping-gestützter Erfassung von Straßenräumen sind sowohl unter- als auch oberirdische Daten von Relevanz. Erstere geben Auskunft über die strukturelle Beschaffenheit der Straßenoberfläche und ermöglichen die frühzeitige Erkennung von Anomalien wie Absackungen oder sich entwickelnde Schlaglöcher. Die oberirdischen Daten stellen Kontextinformationen bereit und erleichtern die visuelle Verortung. Eine kombinierte Darstellung beider Datenquellen ist somit ein hilfreiches Werkzeug bei der Auswertung digitaler Straßenraum-Repräsentationen. Dieser Beitrag präsentiert Techniken zur Interaktion in kombinierten Darstellungen von unterirdischen 2D-Bodenradarinformationen und oberirdischen 3D-Punktwolken. So werden 2D-Bodenradarinformationen auf die Messtrajektorie in zeitgleich erfassten 3D-Punktwolken projiziert, um die Orientierung zu erleichtern. Anomalien werden automatisiert erkannt und visuell hervorgehoben, wodurch die Menge der manuell auszuwertenden Daten signifikant reduziert wird. Evaluationsergebnisse auf Grundlage realweltlicher Datensätze stellen die Nützlichkeit des präsentierten Ansatzes unter Beweis.

1 Einleitung

Techniken des Mobile Mappings finden in unterschiedlichen Gebieten Anwendung (LI 1997) und werden immer häufiger zur Infrastrukturwartung eingesetzt (LI et al. 2017). Kommunen und private Unternehmen erfassen dreidimensionale Geodaten mit Systemen, die unterschiedliche Scanner kombinieren. Dadurch wird eine detaillierte Erfassung und Analyse urbaner Umgebungen, großer Fabrikanlagen und von Infrastrukturnetzwerken ermöglicht (AIRFIELD INVENTORY 2018). Fernerfassungsgeräte wie beispielsweise LiDAR-Scanner können auf beliebige Fahrzeuge montiert werden und ermöglichen eine hochpräzise Aufnahme der Straßenoberfläche, von Bordsteinanten und von Objekten im Straßenraum (JAAKKOLA et al. 2008). Aus diesen Aufnahmen resultierende 3D-Punktwolken stellen eine detaillierte Repräsentation der erfassten Umgebung dar und werden als „digitale Zwillinge“ in einer Reihe unterschiedlicher Anwendungsbereiche eingesetzt (OLSEN & KAYEN 2013; KUMAR et al. 2016). Abhängig von zusätzlich aufgenommenen Daten können 3D-Punktwolken mit RGB-Farben oder Intensitätswerten eingefärbt sein. Dadurch entstehen Datensätze, die auch durch ungeübte Nutzer intuitiv visuell exploriert werden können, wenn sie in GIS-Programmen und speziell für die Darstellung von 3D-Punktwolken entwickelten Programmen angezeigt werden (Abbildung 1).

Bodenradarmessungen (Ground penetrating radar, GPR) werden seit einigen Jahrzehnten für die Untergrundanalyse eingesetzt. GPR-Scanner können Materialeigenschaften mehrere Meter unter der Oberfläche messen und ermöglichen somit Einblicke in die nicht sichtbaren Fundamente von Straßen und Fußwegen (DAVIS & ANNAN 1989). Eine typische Visualisierung eines Bodenradar-

¹ Hasso-Plattner-Institut, Digital Engineering Fakultät, Universität Potsdam, Prof.-Dr.-Helmert-Str. 2-3, D-14482 Potsdam, E-Mail: [johannes.wolf, soeren.discher, juergen.doellner]@hpi.de

B-Scans ist in Abbildung 2 dargestellt. Diese beinhalten eine aufeinanderfolgende Sequenz einzelner Messungen (A-Scans) entlang der Fahrtrichtung. Die X-Achse gibt die gefahrene Strecke an, die Y-Achse zeigt die gemessenen Daten.

Scanner für Bodenradarinformationen können ebenfalls an Fahrzeuge montiert werden und bieten eine Datenquelle für Bereiche, die durch LiDAR nicht erfasst werden können (MOBILE GPR 2017).



Abb. 1: Visualisierung einer 3D-Punktwolke einer Straßenumgebung

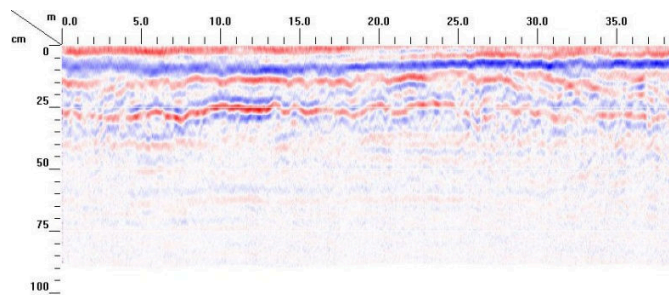


Abb. 2: Visualisierung eines GPR-B-Scans

Die Kombination von oberirdischen 3D-Punktwolken und unterirdischen 2D-Bodenradarinformationen ermöglicht eine umfassendere Analyse von Straßenumgebungen im Vergleich zur individuellen Auswertung beider Datenquellen. Ein häufiger Anwendungsfall für die Auswertung von Bodenradarinformationen ist das frühzeitige Erkennen möglicher Schlaglöcher (HUSTON et al. 2000). Durch die Betrachtung zugehöriger Informationen zur Straßenoberfläche aus der 3D-Punktwolke können in diesem Kontext beispielsweise Kanaldeckel sofort erkannt werden und müssen nicht mehr als mögliche Anomalien ausgewertet werden.

2 Verwandte Arbeiten

Benedetto et al. geben in ihrer Arbeit einen Überblick, wie Bodenradarinformationen zur Analyse des Straßenraums eingesetzt werden können (BENEDETTO et al. 2017). Sie diskutieren detailliert, welche Verarbeitungstechniken verwendet werden können, um die Beschaffenheit der Straßenoberfläche zu ermitteln. Evans et al. fassen Einsatzmöglichkeiten des Bodenradars zur allgemeinen Analyse von Straßen zusammen (EVANS et al. 2008). Saarenketo und Scullion listen die Erkennung von Schlaglochpositionen und Überwachung von Rissbildungen in ihrem Bericht zu Anwendungen von Bodenradar auf Straßen und Autobahnen auf (SAARENKETO & SCULLION 1994). Sie beschreiben weiterhin mögliche Analysen des Bodens und der Straßenschichten sowie die dafür benötigten Techniken zur Dateninterpretation (SAARENKETO & SCULLION 2000).

Giannopoulos beschreibt, wie Bodenradarinformationen visualisiert werden können (GIANNOPOULOS 2005). Ergänzend zu zweidimensionalen Profilen stellt er ein Beispiel für eine dreidimensionale Darstellung vor, in der die Daten in einen Quader eingefasst werden, für den die drei Hauptebenen (xy-, xz- und yz-Ebene) gerendert werden. Üblicherweise werden zweidimensionale GPR-

Profile einzeln dargestellt, mehrere Scans können aber nebeneinander platziert werden, um ein räumliches Gefühl für die Daten zu vermitteln (GeoRadar: 3D and GPR 2005).

Puente et al. vergleichen unterschiedliche mobile Systeme für terrestrisches Laserscanning. Sie zeigen, dass LiDAR weit verbreitet ist und auf unterschiedlichsten Trägersystemen zur Datenerfassung eingesetzt wird. Nutzer können durch das Anzeigen und Bearbeiten dichter Punktwolken realweltliche Bedingungen einfach nachvollziehen (PUENTE et al. 2013). Discher et al. und Eitel et al. beschreiben die Relevanz von 3D-Punktwolken für viele Anwendungen im Geodatenbereich (DISCHER et al. 2019; EITEL et al. 2016). BIASION et al. beschreiben Anwendungen mobiler Laserscanner zur Umgebungsanalyse für Katastrophenmanagement (BIASION et al. 2005). Mehrere Autoren diskutieren die automatisierte Analyse von 3D-Punktwolken: Oberflächenkategorien pro Punkt können aus der Topologie einer 3D-Punktwolke abgeleitet (CHEN et al. 2017) oder durch Ansätze des Deep Learnings ermittelt werden (BOULCH et al. 2017). Ermittelte Oberflächenkategorien können wiederum genutzt werden, um dreidimensionale Modelle von Gebäuden oder Infrastrukturobjekten zu rekonstruieren (TEIZER et al. 2005).

Einen allgemeinen Überblick zu Renderingtechniken für 3D-Punktwolken geben Gross und Pfister (GROSS & PFISTER 2011). Während *photorealistische* Ansätze (SCHÜTZ & WIMMER 2015; PREINER et al. 2012) darauf abzielen, typische Artefakte (z.B. visuelle Überlagerungen oder lückenhafte Oberflächendarstellungen) durch das Rendering der Punkte mit geeigneter Größe und Ausrichtung zu reduzieren, konzentrieren sich *nicht-photorealistische* Ansätze (SIMONS et al. 2014; ZHANG et al. 2014) auf die gezielte Hervorhebung von Kanten und Strukturen innerhalb der erfassten Daten. All diese Renderingtechniken können in die Visualisierung integriert werden, wie am Beispiel des *Eye Dome Lighting* von Boucheny (BOUCHENY 2009) demonstriert. Fokus-und-Kontext-Visualisierungen wurden im Bereich von Mesh-basierten Modellen diskutiert (VAARANIEMI et al. 2013; ELMQVIST & TSIGSAS 2008) – von statischen Sichtbarkeitsmasken (SIGG et al. 2012) bis zu interaktiven Linsen (TRAPP et al. 2008). Discher et al. wenden solche Techniken auf 3D-Punktwolken an, sodass Nutzer für ihre Arbeit relevante, aber normalerweise verdeckte, Bereiche hervorheben können (DISCHER et al. 2017). Ähnlich zum hier gezeigten Ansatz verwenden sie ein Multi-Pass-Rendering basierend auf G-Buffern, allerdings kombinieren Sie 3D-Punktwolken nicht mit weiteren Geodaten.

Um 3D-Punktwolken beliebiger Größe rendern zu können, trennen aktuelle Out-of-core-Ansätze das Rendering vom Datenmanagement. Beispielhafte Systeme (MARTINEZ-RUBI et al. 2016; GOSWANI et al. 2013; RUSINKIEWICZ & LEVOY 2000) unterteilen 3D-Punktwolken in kleinere, repräsentative Bereiche, die in Echtzeit gerendert werden können.

3 Datencharakteristik und Anforderungen

Aktuelle Technik aus dem Bereich der Fernerkundung ermöglicht es, digitale Zwillinge der realen Welt mit sehr geringem zeitlichem und finanziellem Aufwand zu erfassen. Technische Grundlage sind (1) aktive Sensoren (z.B. LiDAR), bei der elektromagnetische Strahlung ausgesendet wird, um Entfernungen zwischen Sensor und Oberfläche zu messen (EITEL et al. 2016) und (2) passive Sensoren (z.B. Digitalkameras), die natürliche Strahlung nutzen, um aus einer fortlaufenden Reihe von Bildern mit Hilfe von *Dense Image Matching* 3D-Informationen abzuleiten (REMONDINO et al. 2013).

Mit passiven Sensoren können Rohdaten schneller erfasst werden, andererseits erfordern sie eine rechenintensive Nachbearbeitung, während aktive Sensoren 3D-Punktwolken direkt zum Zeitpunkt der Aufnahme generieren. Mit beiden Ansätzen können detaillierte Datensätze erzeugt werden, die hohe Punktdichten liefern. 3D-Punktwolken können für ganze Gebäudekomplexe, Städte oder Länder in großem Maßstab effizient generiert werden, indem Sensoren an ausgewählten Standorten platziert (lokale terrestrische Erfassung), auf mobile Trägerplattformen wie Autos oder Züge montiert (Mobile Mapping) oder an UAVs und Flugzeugen (luftgestützte Erfassung) befestigt werden. So können Datensätze mit Milliarden von Punkten und hunderten Gigabyte an Daten entstehen.

Bodenradar wird für die Analyse unterirdischer Bereiche genutzt. Dabei werden elektromagnetische Wellen in den Untergrund abgestrahlt, deren Reflektionen an unterschiedlichen Schichten der Straße und des Bodens Aufschlüsse über deren Beschaffenheit geben. Radarantennen zur Straßenanalyse werden üblicherweise an Messfahrzeugen angebracht, die im fließenden Verkehr mitfahren können. Die Antennen sind ein Stück über dem Boden montiert und während der Fahrt kann der Abstand zur Fahrbahn leicht schwanken. Um dies zu berücksichtigen, wird üblicherweise eine Time-Zero-Korrektur zur Sensorkalibrierung durchgeführt. Nach der Erfassung werden die Daten zumeist in der Form von B-Scans ausgewertet. In der in Abbildung 2 gezeigten Zweifarbendarstellung in rot und blau wird die Ausrichtung der Amplitude des empfangenen Signals durch die Farbe dargestellt und deren Größe durch die Intensität. Mobile-Mapping-Fahrzeuge nutzen das *Global Positioning System (GPS)* zur Positionserfassung. Dessen Messdaten werden in Paaren von Zeitstempeln und Positionen vorgehalten, die zusammen die Trajektorie des zurückgelegten Weges angeben. Unter Nutzung dieser Angaben und dem Wissen über die fixen Positionen der LiDAR-Scanner und Bodenradarantennen am Fahrzeug können die erfassten Daten aller Quellen präzise im gleichen räumlichen Koordinatensystem platziert werden.

Unter Berücksichtigung der Datencharakteristiken der oben erwähnten Datenquellen wurden folgende Anforderungen für eine kombinierte Darstellung von 2D-Bodenradar und 3D-Punktwolken abgeleitet:

- **A1:** Keine Beschränkung auf Aufnahmemethoden, Anzahl, räumliche Ausdehnung oder Größe der Datensätze. Letzteres gilt insbesondere für 3D-Punktwolken, weil diese häufig hunderte Gigabyte Rohdaten umfassen können.
- **A2:** Korrekte Positionierung von Bodenradar- und 3D-Punktwolken in einem homogenen dreidimensionalen Referenzsystem.
- **A3:** Verdeckungsfreie Darstellung individueller B-Scans eines Bodenradar-Datensatzes.
- **A4:** Visuelles Filtern und Hervorheben bestimmter Gebiete in den Daten, die von besonderem Interesse für die Auswertung sind.

4 Systemüberblick

Die oben genannten Anforderungen sind in den Entwurf und die Implementierung der Anwendung eingeflossen. Das System besteht aus folgenden Hauptbestandteilen:

4.1 Punktwolkenmanager

Alle 3D-Punktwolken werden in einem einzelnen, homogenen räumlichen Datenmodell gesammelt. Auf dieses Modell wird über den Punktwolkenmanager zugegriffen, der die räumlichen Informationen mit allen verfügbaren Pro-Punkt-Attributen (z.B. Farbwerte) vorhält. Um A1 gerecht zu werden, müssen die Daten in räumlichen Datenstrukturen vorgehalten werden, die Level-of-detail-Repräsentationen (LOD-Repräsentationen) ermöglichen, wie zum Beispiel Quadrees (GAO et al. 2014), Octrees (ELSEBERG et al. 2013) oder kd-Trees (RICHTER et al. 2015). Diese LOD-Repräsentationen werden durch die Prozessierungs-Engine generiert.

4.2 Bodenradarmanager

In ähnlicher Weise werden Bodenradarinformationen effizient durch den Bodenradarmanager zur Verfügung gestellt. Daten der B-Scans werden zusammen mit den Daten der Trajektorie verarbeitet und können dadurch im gleichen dreidimensionalen System wie die Punktwolke platziert werden (A2). B-Scans können individuell angefragt werden (A3). Wegen des deutlich geringeren Datenaufkommens werden für das Bodenradar keine LOD-Repräsentationen generiert. Die in den Testdaten verarbeiteten Datensätze umfassten beispielsweise nur höchstens 25,7 MB Rohdaten pro B-Scan.

4.3 Prozessierungs-Engine

Mithilfe der Prozessierungs-Engine können die erfassten Daten vorverarbeitet werden. So wird die Georeferenzierung der Bodenradardaten anhand der Trajektorie vorgenommen, die 3D-Punktwolken werden um Ausreißer bereinigt und es werden LOD-Repräsentationen für sie erzeugt. Diese Verarbeitung kann parallel für mehrere Datensätze ausgeführt werden und nutzt die jeweils vorhandenen Systemressourcen optimal aus. Die verarbeiteten Daten stehen anschließend über den Punktwolkenmanager und Bodenradarmanager zur Verfügung.

4.4 Visualisierungs-Engine

Die Visualisierungs-Engine dient der Bereitstellung einer interaktiven, kombinierten Darstellung der vorhandenen Datensätze. Dabei findet ein Multi-Pass-Rendering mit mehreren G-Buffern (SAITO & TAKAHASHI 1990) Anwendung:

Für jeden Datentyp wird der zugehörige Manager angefragt, der nur die Ausschnitte der Daten zurückgibt, die für die aktuelle Ansicht relevant sind. So wird beispielsweise View-Frustum-Culling und Detail-Culling eingesetzt, um die Menge der anzuzeigenden Punkte an die vorhandenen CPU- und GPU-Kapazitäten anzupassen. Die geladenen Daten werden in separate G-Buffer gerendert, spezialisierte Frame-Buffer-Objekte mit kombinierten 2D-Texturen für Farbe, Tiefeninformation oder Normalenvektorausrichtung. Die G-Buffer werden anschließend zusammengesetzt und ermöglichen es, bildbasierte Nachverarbeitungsschritte durchzuführen, die der visuellen Filterung und Hervorhebung dienen, wie zum Beispiel beim Hervorheben von Tiefenunterschieden in 3D-Punktwolken mittels Eye Dome Lighting (BOUCHENY et al. 2009) oder interaktiven Linsen. Die Nachverarbeitung kann zur Laufzeit über die Nutzeroberfläche konfiguriert werden.

4.5 Nutzeroberfläche

Basierend auf den Aktionen der Nutzer werden auf der Nutzeroberfläche die angefragten Daten dargestellt. Insbesondere können Nutzer (1) Position und Betrachtungswinkel ändern, (2) auswählen welche B-Scans angezeigt werden sollen, (3) diese B-Scans horizontal und vertikal anschneiden, (4) Nachverarbeitungsschritte für die Darstellung auswählen und konfigurieren sowie (5) Bereiche von besonderem Interesse hervorheben (A4).

5 Visualisierungstechniken

Die kombinierte Darstellung von 2D-Bodenradar und 3D-Punktwolken basiert auf zwei Hauptkomponenten in der Nutzeroberfläche: Einer 3D-Szenendarstellung und einem 2D-Übersichtsfenster.

5.1 3D-Szenendarstellung

Zunächst werden die B-Scans des Bodenradars mittels der Trajektorie und der Information über die genaue Lage der Antennen in den dreidimensionalen Raum platziert (A2). Nutzer können sich gegenseitig verdeckende B-Scans bei Bedarf gezielt ausblenden (A3). Ein kompletter Bodenradar-Datensatz wird durch eine quaderförmige Struktur repräsentiert, die den gesamten vom Bodenradar erfassten Bereich überdeckt (Abbildung 3). Der Raum zwischen den B-Scans wird dabei durch interpolierte Werte aufgefüllt. Dadurch kann der dargestellte Ausschnitt je nach Bedarf vertikal und horizontal angeschnitten werden, um Bereiche von besonderem Interesse hervorzuheben (A4).

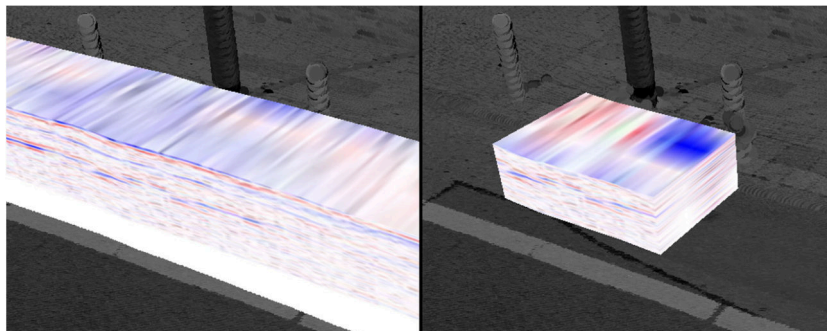


Abb. 3: Auf die GPS-Trajektorie platzierter Quader (links). Vertikal und horizontal angeschnittener Quader (rechts).

Die Sichtbarkeit der Bodenradarinformationen wird verbessert, indem der Quader nicht unter der Straßenoberfläche dargestellt, sondern über diese gehoben wird (A3). Um den räumlichen Kontext zur 3D-Punktwolke beizubehalten, werden die über dem Quader befindlichen Punkte gleichermaßen angehoben. Zusätzlich werden sie eingefärbt, um den Unterschied zu den anderen Punkten deutlich zu machen (Abbildung 4). Eine interaktive Linse ermöglicht es, Punkte über dem Quader in der Umgebung des Mauszeigers auszublenden, um einen direkten Blick auf die Daten des Bodenradars zu erhalten. Alternativ kann der Modus auch umgekehrt eingestellt werden, sodass über dem Quader befindliche Punkte ausschließlich in der Umgebung des Mauszeigers dargestellt werden (A4).

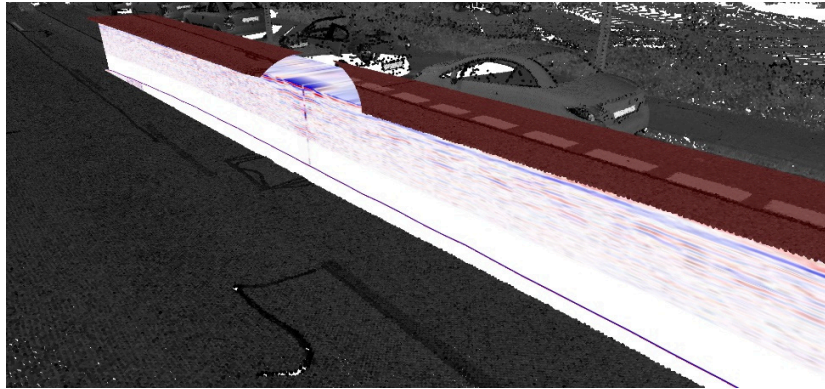


Abb. 4: Über den Quader gehobene Punkte sind hervorgehoben. Eine interaktive Linse ermöglicht einen direkten Blick auf die Daten.

5.2 2D-Übersichtsfenster

In diesem Fenster wird ein Gesamtüberblick zu den Bodenradarinformationen eines Datensatzes gegeben (Abbildung 5). Mit Hilfe des Übersichtsfensters kann die Darstellung des Quaders in der 3D-Szenendarstellung angepasst werden. Dies umfasst (1) das Einstellen der Höhe über der Fahrbahnoberfläche, (2) das Zuschneiden in horizontaler und vertikaler Richtung sowie (3) das Ein- und Ausblenden spezifischer B-Scans. Beim Wählen einer bestimmten Breite für einen horizontalen Ausschnitt kann dieses „Sichtfenster“ entlang der Trajektorie verschoben werden. Dadurch wird gleichzeitig auch die Kameraposition innerhalb der 3D-Szene verschoben, sodass immer die jeweilige Umgebung in der 3D-Punktwolke sichtbar und auf den Quader zentriert ist (A4).

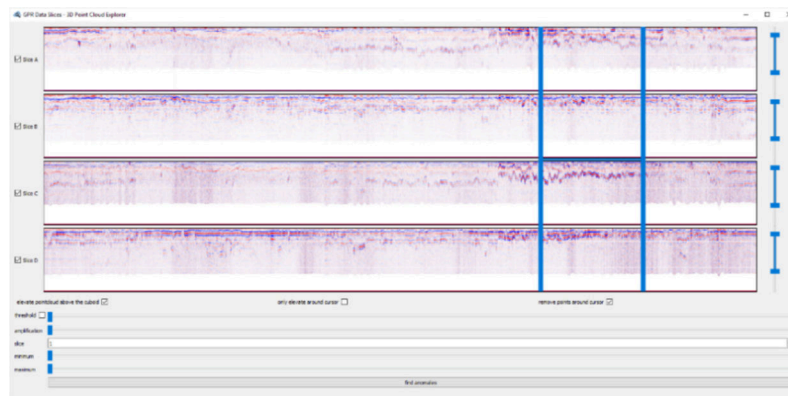


Abb. 5: 2D-Übersichtsfenster mit Bodenradarinformationen und Optionen zum Anschneiden und Hervorheben.

Nutzer können weiterhin einstellen, wie Texturen aus den Bodenradardaten generiert werden. Die Eingabedaten enthalten Rohinformationen zum reflektierten Signal, die generierten Texturen zeigen die Amplituden dieser Messwerte in rot und blau für die positiven und negativen Werte. Da die Werte stark schwanken, können Nutzer einstellen, wie sie skaliert werden sollen. Beispielsweise ist eine hohe Skalierung sinnvoll für Datenbereiche, in denen es nur geringe Unterschiede in den Messwerten gibt. Zusätzlich können Bereiche mit großen Unterschieden zu den jeweiligen umgebenden Werten durch das Einstellen von Schwellwerten hervorgehoben werden, wodurch Anomalien in den Bodenradarinformationen interaktiv lokalisiert werden können.

6 Anomalie-Erkennung

Bei der großflächigen Aufnahme von Bodenradardaten fallen große Datenmengen an, deren manuelle Auswertung erheblichen Zeitaufwand verursacht. Große Teile der Daten enthalten aber keine Informationen, die im weiteren Verlauf der Auswertung relevant sind. Insbesondere sind über lange Strecken gleichmäßig verlaufende Straßenschichten ein Zeichen für einen guten Straßenzustand, bei dem kein Anlass zur detaillierten Begutachtung besteht. Hingegen sind alle vom Normalzustand abweichenden Bereiche von Interesse. Zur Unterstützung bei der Auswertung der Daten werden die Bodenradarinformationen automatisiert auf Anomalien hin untersucht, um diese für die Nutzer hervorzuheben. Bei der manuellen Analyse müssen anschließend nur noch diejenigen Bereiche berücksichtigt werden, in denen Abweichungen existieren.

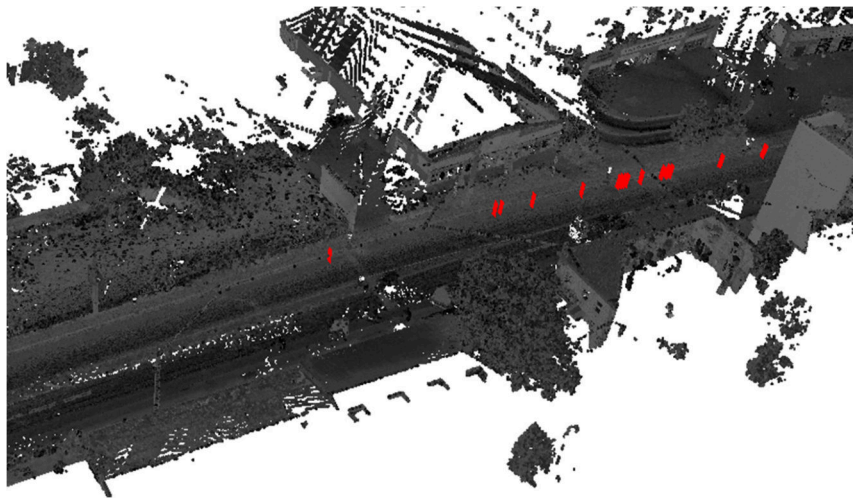


Abb. 6: Hervorhebung der Position gefundener Anomalien in der 3D-Szene.

Dazu werden etablierte Machine-Learning-Verfahren aus dem Bereich der Bildanalyse eingesetzt. Nach der Umwandlung der Rohdaten des Bodenradars in Texturen können diese als Bilder interpretiert werden. Die oben beschriebene Darstellung der Messwerte mit zwei Farben erzeugt Bilder, in denen der Linienverlauf interpretiert werden kann. In der prototypischen Implementierung wurde ein Netzwerk zur Handschrifterkennung verwendet (PEDREGOSA et al., 2011), das sich auch für diesen Anwendungszweck als geeignet herausgestellt hat. In einem Testdatensatz wurden Bereiche markiert, in denen Anomalien in den Daten enthalten sind. Das mit diesen Daten trainierte Netzwerk kann anschließend auf unbekannten Datensätzen angewendet werden, um Bereiche mit Anomalien zu erkennen. Diese werden in der Anwendung sowohl in der 3D-Szene als auch im Übersichtsfenster hervorgehoben (Abbildung 6). Nutzer können durch diese Darstellung schnell zu den für sie interessanten Gebieten innerhalb des Datensatzes springen.

7 Evaluation

Das hier präsentierte System wurde in C++ entwickelt und erweitert das von Discher et al. vorgestellte System (DISCHER et al. 2017). Die Testdaten umfassen vier parallel erfasste B-Scans des

Bodenradars, die kontinuierlich in Fahrtrichtung erfasst wurden (Abbildung 7) und 3D-Punktwolkendaten aus einer Mobile-Mapping-Erfassung mit LiDAR. Zwei Antennen des Bodenradars haben mit einer Frequenz von 2.000 MHz gemessen, die anderen beiden mit 1.000 MHz. Die Signale reichen bis zu 0,45 m bzw. 0,90 m in den Boden. Die Antennen wurden im Abstand von jeweils 0,42m zueinander positioniert. Jeder B-Scan enthält 650 m Straßendaten mit 13.146 Datenpunkten, die jeweils 512 mal 4 Byte umfassen.



Abb. 7: An das Messfahrzeug montierte Bodenradarantennen.

Die 3D-Punktwolke ist eine Kombination aus zwei LiDAR-Scans, die nach links und rechts vorne oberhalb des Fahrzeugs aufgenommen wurden. Neben den dreidimensionalen Koordinaten hat jeder der 58,7 Millionen Messpunkte Informationen über die Intensität des reflektierten Strahles, die als Grauwerte dargestellt werden. In dem vom Bodenradar abgedeckten Bereich wurden mehr als 1.000 Punkte pro Quadratmeter erfasst.

7.1 Nutzbarkeit

Die Anordnung der Antennen sorgt für eine Hürde in der Darstellung der Daten: Die erste und dritte Antenne messen mit einer Frequenz, die zweite und vierte mit einer anderen. Diese Anordnung ist hilfreich, um den annähernd gleichen Bereich mit zwei unterschiedlichen Frequenzen und damit unterschiedlichen Tiefen und Genauigkeiten zu messen. Allerdings sind benachbarte B-Scans dadurch nicht mehr direkt vergleichbar. Eine Interpolation der Zwischenwerte kann aus diesem Grund zu unerwarteten Ergebnissen führen, die individuelle Auswahl der gewünschten B-Scans hilft dabei, das Problem zu umgehen. Weil die B-Scans dicht nebeneinanderliegen, verdecken sie sich gegenseitig. Da die exakte räumliche Platzierung innerhalb der 3D-Punktwolke essentieller Bestandteil der Darstellung ist, kann der Abstand untereinander nicht einfach vergrößert werden. Die Sichtbarkeit innerer B-Scans kann wiederum durch die individuelle Auswahl der anzuzeigenden B-Scans hergestellt werden.

7.2 Performanz

Wie von Discher et al. gezeigt, ist das verwendete System in der Lage, interaktive Frameraten für beliebig große 3D-Punktwolken zu generieren (DISCHER et al. 2017). Die Bodenradarinformationen werden als Rohdaten von dem hier vorgestellten System eingelesen und in Texturen umgewandelt, die in der Anwendung angezeigt werden können. Die Performanz des Systems beruht

deshalb auf der Dauer des initialen Ladevorgangs sowie – während der Laufzeit – auf der benötigten Zeit zur Aktualisierung und zum Rendern der B-Scan-Texturen. In den Testdaten haben die Texturen eine Auflösung von 13.146 x 512 Pixeln mit einer Tiefe von 4 Byte für die Rohdaten und einem Byte in den resultierenden Texturen. Sowohl die Aktualisierung als auch das Rendern der Texturen ist vollständig GPU-beschleunigt und damit im Vergleich zur Verarbeitung der 3D-Punktwolke vernachlässigbar. Für größere Datensätze könnten Speicherverwaltung und Level-of-Detail-Verfahren eine größere Rolle spielen, um der Begrenzung des verfügbaren GPU-Speichers zu begegnen.

8 Fazit und Ausblick

Eine kombinierte Darstellung von 2D-Bodenradar und 3D-Punktwolken ermöglicht Vergleiche zwischen beiden Datensätzen und somit eine bessere Datenauswertung, zum Beispiel im Kontext der Analyse des Straßenzustandes. Anomalien in den Bodenradarinformationen können mit der 3D-Punktwolke abgeglichen werden, um auch an der Straßenoberfläche sichtbare Abweichungen zu erkennen. Kanaldeckel können in der 3D-Punktwolke sowohl bei manueller Auswertung als auch durch automatisierte Verfahren einfach identifiziert werden und deren Position kann bei der Anomalie-Erkennung in den Bodenradarinformationen berücksichtigt werden. Durch das Zuschneiden der B-Scans auf bestimmte Bereiche können sich Nutzer auf relevante Details fokussieren und störende verdeckende Informationen ausblenden. Einzelne B-Scans können komplett ausgeblendet werden, um die visuelle Komplexität weiter zu reduzieren, insbesondere im Bezug auf die unterschiedlichen Messfrequenzen. Ferner könnte die Implementierung von Level-of-Detail-Verfahren für größere Datensätze hilfreich sein.

Die Darstellung mehrerer Bodenradar-Scans im Bereich von Kreuzungen und bei parallel befahrenen Spuren bieten Potenzial für weitere Entwicklungen bezüglich der Auflösung sich in diesen Bereichen überlagernder Daten.

Die über das Bodenniveau gehobene Darstellung von B-Scans und gleichzeitiges Anheben der darüberliegenden Punkte aus der 3D-Punktwolke ermöglichen eine fokussierte Sicht auf die 2D-Bodenradarinformationen. Das Ausblenden von Punkten im Bereich einer durch den Mauszeiger gesteuerten Linse erlaubt die Inspektion der direkt darunterliegenden Daten im jeweiligen Kontext. Das Einstellen von Schwellwerten und Skalierungsfaktoren für die Messwerte des Bodenradars unterstützt die Auswertung in Bezug auf Anomalien. Die automatisierte Hervorhebung potenziell relevanter Bereiche beschleunigt das Auswerten der Daten, weil nur noch Teilmengen der aufgenommenen Information betrachtet werden müssen.

Anomalien in den Bodenradarinformationen an Positionen, die in der 3D-Punktwolke als Kanaldeckel identifiziert wurden, können entsprechend gefiltert werden. Dadurch kann die Menge der manuell auszuwertenden Bereiche weiter eingeschränkt werden.

9 Danksagung

Wir danken dem Amt für Geoinformation, Vermessung und Kataster der Stadt Essen für die Bereitstellung von Daten, die im Rahmen der hier vorgestellten Arbeit verwendet wurden.

10 Literaturverzeichnis

- AIRFIELD INVENTORY, 2018. <https://www.xyht.com/lidarimaging/huge-airport-one-vehicle/>, letzter Zugriff 27.10.2018.
- BENEDETTO, A., TOSTI, F., CIAMPOLI, L. B. & D'AMICO, F., 2017: An overview of ground-penetrating radar signal processing techniques for road inspections. *Signal Processing*, **132**, 201-209.
- BIASION, A., BORNAZ, L. & RINAUDO, F., 2005: Laser scanning applications on disaster management. *Geo-information for Disaster Management*, Springer, Berlin/Heidelberg, 19-33.
- BOUCHENY, C., 2009: Interactive Scientific Visualization of Large Datasets: Towards a Perceptive-Based Approach. Doktorarbeit, Université Joseph Fourier, Grenoble.
- BOULCH, A., SAUX, B. L. & AUDEBERT, N., 2017: Unstructured point cloud semantic labeling using deep segmentation networks. *Eurographics Workshop on 3D Object Retrieval*, 2017.
- CHEN, D., WANG, R. & PEETHAMBARAN, J., 2017: Topologically aware building rooftop reconstruction from airborne laser scanning point clouds. *IEEE TGRS*, **55**(12), 7032-7052.
- DAVIS, J. L. & ANNAN, A. P., 1989: Ground-penetrating radar for high-resolution mapping of soil and rock stratigraphy. *Geophysical prospecting*, **37**(5), 531-551.
- DISCHER, S., RICHTER, R. & DÖLLNER, J., 2018: A scalable WebGL-based approach for visualizing massive 3d point clouds using semantics-dependent rendering techniques. *Proceedings of Web3D*, 19:1-19:9.
- DISCHER, S., RICHTER, R. & DÖLLNER, J., 2017: Interactive and view-dependent see-through lenses for massive 3d point clouds. *Advances in 3D Geoinformation*, 49-62.
- DISCHER, S., RICHTER, R., TRAPP, M. & DÖLLNER, J., 2019: Service-oriented processing and analysis of massive point clouds in geoinformation management. *Service-Oriented Mapping*, Springer, Berlin/Heidelberg, 43-61.
- EITEL, J. U., HÖFLE, B., VIERLING, L. A., ABELLÁN, A., ASNER, G. P., DEEMS, J. S., GLENNIE, C. L., JOERG, P. C., LEWINTER, A. L., MAGNEY, T. S., MANDLBURGER G., MORTON, D. C., MÜLLER, J. & VIERLING, K. T., 2016: Beyond 3-D: The new spectrum of lidar applications for earth and ecological sciences. *Remote Sensing of Environment*, **186**, 372-392.
- ELMQVIST, N. & TSIGAS, P., 2008: A taxonomy of 3d occlusion management for visualization. *IEEE TVCG*, **14**(5), 1095-1109.
- ELSEBERG, J., BORRMANN, D. & NÜCHTER, A., 2013: One billion points in the cloud – an octree for efficient processing of 3D laser scans. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, **76**, 76-88.
- EVANS, R. D., FROST, M. W., STONECLIFFE-JONES, M. & DIXON, N., 2008: A review of pavement assessment using ground penetrating radar (GPR). *12th International Conference on Ground Penetrating Radar*.
- GAO, Z., NOCERA, L., WANG, M. & NEUMANN, U., 2014: Visualizing aerial lidar cities with hierarchical hybrid point-polygon structures. *Graphics Interface*, 137-144.
- Geo Radar: 3D and GPR, 2005. <http://www.geo-radar.pl/en/methods/georadar/3d/>, letzter Zugriff 25.10.2018.
- GIANNOPOULOS, A., 2005: Modelling ground penetrating radar by gprmax. *Construction and building materials*, **19**(10), 755-762.

- GROSS, M. & PFISTER, H., 2011: Point-based graphics. Morgan Kaufmann, Burlington.
- HUSTON, D. R., PELCZARSKI, N. V., ESSER, B. & MASER, K. R., 2000: Damage detection in roadways with ground penetrating radar. Eighth International Conference on Ground Penetrating Radar, **4084**, 91-95.
- JAAKKOLA, A., HYYPPÄ, J., HYYPPÄ, H. & KUKKO, A., 2008: Retrieval algorithms for road surface modelling using laser-based mobile mapping. *Sensors*, **8**(9), 5238-5249.
- KUMAR, S., DESHPANDE, A., HO, S. S., KU, J. S. & SARMA, S. E., 2016: Urban street lighting infrastructure monitoring using a mobile sensor platform. *IEEE Sensors Journal*, **16**(12), 4981-4994.
- LI, F., ELBERINK, S. O. & VOSSELMAN, G., 2017: Semantic labelling of road furniture in mobile laser scanning data. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences*, **42**(2/W7), 247-254.
- LI, R., 1997: Mobile mapping: An emerging technology for spatial data acquisition. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, **63**(9), 1085-1092.
- MARTINEZ-RUBI, O., DE KLEIJN, M., VERHOEVEN, S., DROST, N., ATTEMA, J., VAN MEERSBERGEN, M., VAN NIEUWPOORT, R., DE HOND, R., DIAS, E. & SVETACHOV, P., 2016: Using modular 3D digital earth applications based on point clouds for the study of complex sites. *International Journal of Digital Earth*, **9**(12), 1135-1152.
- Mobile GPR, 2017: <https://www.catsurveys.com/Services/MGPR>, letzter Zugriff 26.06.2018.
- OLSEN, M. J. & KAYEN, R., 2013: Post-earthquake and tsunami 3D laser scanning forensic investigations. *Forensic Engineering 2012: Gateway to a Safer Tomorrow*, 477-486.
- PEDREGOSA, F., VAROQUAUX, G., GRAMFORT, A., MICHEL, V., THIRION, B., GRISEL, O., BLONDEL, M., PRETTENHOFER, P., WEISS, R., DUBOURG, V., VANDERPLAS, J., PASSOS, A., COURCEPEAU, D., BRUCHER, M., PERROT, M. & DUCHESNAY, E., 2011: Scikit-learn: Machine Learning in Python. *Journal of Machine Learning Research*, **12**, 2825-2830.
- PREINER, R., JESCHKE, S. & WIMMER, M., 2012: Auto splats: Dynamic point cloud visualization on the GPU. *EGPGV*, 139-148.
- PUENTE, I., GONZÁLEZ-JORGE, H., MARTÍNEZ-SÁNCHEZ, J. & ARIAS, P., 2013: Review of mobile mapping and surveying technologies. *Measurement*, **46**(7), 2127-2145.
- REMONDINO, F., SPERA, M. G., NOCERINO, E., MENNA, F., NEX, F. & GONIZZI-BARSANTI, S., 2013: Dense Image Matching: Comparisons and Analyses. *Digital Heritage International Congress*, 47-54.
- RICHTER, R., DISCHER, S. & DÖLLNER, J., 2015: Out-of-core visualization of classified 3D point clouds. *3D Geoinformation Science*, Springer, Berlin/Heidelberg, 227-242.
- RUSINKIEWICZ, S. & LEVOY, M., 2000: Qsplat: A multiresolution point rendering system for large meshes. *SIGGRAPH*, 343-352.
- SAARENKETO, T. & SCULLION, T., 1994: Ground penetrating radar applications on roads and highways. Research Report 1923-2F, Texas Transportation Institute, College Station, Texas.
- SAARENKETO, T. & SCULLION, T., 2000: Road evaluation with ground penetrating radar. *Journal of applied geophysics*, **43**(2-4), 119-138.
- SAITO, T. & TAKAHASHI, T., 1990: Comprehensible rendering of 3-D shapes. *ACM SIGGRAPH Computer Graphics*, **24**, 197-206.

- SCHÜTZ, M. & WIMMER, M., 2015: High-quality point-based rendering using fast single-pass interpolation. *Digital Heritage*, 369-372.
- SCHÜTZ, M. & WIMMER, M., 2015: Rendering large point clouds in web browsers. *Proceedings of CESC*, 83-90.
- SIGG, S., FUCHS, R., CARNECKY, R. & PEIKERT, R., 2012: Intelligent cutaway illustrations. *Proceedings of PacificVis*, 185-192.
- SIMONS, L., HE, S., TITTMAN, P. & AMENTA, N., 2014: Pointbased rendering of forest lidar. *Proceedings of EnvirVis*, 19-23.
- TEIZER, J., KIM, C., HAAS, C., LIAPI, K. & CALDAS, C., 2005: Framework for real-time three-dimensional modeling of infrastructure. *TRR Journal*, **1913**, 177-186.
- TRAPP, M., GLANDER, T., BUCHHOLZ, H. & DÖLLNER, J., 2008: 3D generalization lenses for interactive focus + context visualization of virtual city models. *International Conference Information Visualisation*, 356-361.
- VAAARIANIEMI, M., FREIDANK, M. & WESTERMANN, R., 2013: Enhancing the visibility of labels in 3D navigation maps. *Progress and new trends in 3D geoinformation sciences*, 23-40.
- ZHANG, L., SUN, Q. & HE, Y., 2014: Splatting lines: An efficient method for illustrating 3D surfaces and volumes. *18th Meeting of the ACM SIGGRAPH Symposium on Interactive 3D Graphics and Games*, 135-142.